

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Análisis e implementación de un multiplexor basado en redes de Bragg en fibra óptica en una red óptica pasiva de topología tipo estrella

Analysis and Implementation of a multiplexor based on optical fiber Bragg grating on a star passive optical network

Claudia Milena Serpa Imbett*

Nelson Darío Gómez Cardona**

Instituto Tecnológico Metropolitano (Colombia)

Neil Guerrero González ***

Universidad de Antioquia (Colombia)

* Ingeniera Física y magíster en Ciencias Físicas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). Investigadora del Instituto Tecnológico Metropolitano Institución Universitaria. *claudiaserpa@itm.edu.co*

Correspondencia: Centro de Investigación Fraternidad, calle 54A # 30-01, Medellín (Colombia). Tel: 57-4-4600727, Ext. 5590

** Ingeniero Físico y magíster en Ciencias Físicas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). Docente investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano Institución Universitaria. *nelsongomez@itm.edu.co*

*** Ingeniero Electrónico y magíster en Automatización, Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales (Colombia). Profesor de la Universidad de Antioquia, estudiante de doctorado de la Universidad Tecnológica de Dinamarca, Metro-Access and Short Range Systems Group, DTU Fotonik, Dinamarca. *nggo@fotonik.dtu.dk*

Subvencions y apoyos recibidos: Este trabajo se hizo con fondos del Centro de Investigación del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) Institución Universitaria de Medellín (Colombia). Código: P07203.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una red de fibra óptica en el laboratorio de fibra óptica del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, que es configurada a partir de diferentes topologías en un escenario con condiciones similares a las reales para realizar pruebas a dispositivos con enlaces hasta 45 km. En esta red se implementa un multiplexor sobre la base de redes de Bragg en fibras ópticas para la consiguiente multiplexación por división de longitud de onda. Usando este dispositivo, se hace un análisis de la transmisión de cuatro longitudes de onda a través de 12 y 32 km de fibra monomodo estándar. Las simulaciones numéricas muestran un buen desempeño del sistema bajo condiciones de temperatura extrema. Este es el primer reporte experimental en Colombia de un multiplexor óptico para redes pasivas multiplexadas por longitud de onda.

Palabras clave: multiplexor óptico, pérdidas por inserción, redes de Bragg en fibra óptica, WDM-PON.

Abstract

In this work, we designed and built a fiber optic-network in the optical laboratory of the Instituto Tecnológico Metropolitano of Medellín City. This network was used to emulate different topologies in similar conditions to real environments with the possibility to make connections up to 45 km. In this network, an optical multiplexer based on fiber Bragg grating was implemented for wavelength division multiplexing in a passive optical network. By using this device, the transmission of four different wavelengths through 12 and 32 km of single-mode optical fiber is demonstrated with acceptable power levels in reception at 12 km. Numerical simulations show good performance of the system under extreme temperature conditions. This is the first experimental report in Colombia of an optical multiplexer for wavelength-division-multiplexed passive optical networks.

Keywords: optical multiplexer (MUX), insertion loss, Fiber Bragg Grating (FBG), WDM-PON.

Fecha de recepción: 16 de marzo de 2010
Fecha de aceptación: 8 de octubre de 2010

1. INTRODUCCIÓN

Las redes ópticas pasivas PON (*Passive Optical Networks*) en las que se basan las tecnologías FTTx (*fiber to the x*), que son las que están en desarrollo para servicios de acceso de banda ancha [1], ofrecen mayor flexibilidad tanto por su topología de árbol (arquitecturas punto-multipunto) así como por ahorro de energía debido a los componentes pasivos en su infraestructura. Estas arquitecturas punto-multipunto requieren de técnicas de multiplexación para proveer capacidad de múltiple acceso. En primer lugar, la técnica de multiplexación por división de tiempo TDM (*Time Division Multiplexing*) se usa para acceder y compartir el ancho de banda de la red en función del dominio del tiempo. Esta técnica reduce los costos de acceso a la red, pero para aplicaciones recientes como la televisión de alta definición HDTV (*High-definition TV*) y el video 3D no tiene el ancho de banda suficiente. Con el fin de aumentar la capacidad y el ancho de banda de la red se usa la multiplexación por longitud de onda WDM (*Wavelegnth División Multiplexing*) para la transmisión simultánea de múltiples longitudes de onda por una misma fibra [1], [2]; sin embargo, una red WDM es costosa ya que exige una infraestructura dedicada para cada usuario.

El uso de las PON se dirige hacia la creación de troncales de velocidad de acceso menor en donde converge el tráfico de redes locales. Las topologías tradicionales para las redes ópticas son el anillo y la estrella; sin embargo, últimamente existe una controversia acerca de las posibilidades de tener una red con una topología que permita elevar el nivel de confiabilidad y recuperación ante los errores (*mesh networks*), o redes de supervivencia (*survability networks*). Independientemente de la topología y los mecanismos de supervivencia de la red, las arquitecturas propuestas deben enfrentar dos de los actuales problemas que presenta el desarrollo de nuevas tecnologías: la compatibilidad hacia atrás y la posibilidad de un crecimiento y adopción gradual [3], [4].

Una solución para aumentar el ancho de banda en redes FTTx son las redes WDM-PON, la cual consiste en una oficina central CO (*Central Office*) que usa desde multiplexores (MUX) ópticos con estabilidad térmica, preferiblemente pasivos para la transmisión simultánea de múltiples longitudes de onda sobre una misma línea de transmisión óptica (LTO)

de fibra [3], hasta llegar a las unidades de redes ópticas (ONU, *Optical Network Unit*) distribuidas en una topología tipo estrella. Las condiciones para el éxito de la transmisión en la LTO conjugan las características de los MUX, como son la pérdida por inserción y distribución espectral con la capacidad de transmisión en la longitud de la fibra limitada por la atenuación y la presencia de elementos generadores de pérdidas, y también por el tipo de fibra escogida para la LTO. Uno de los retos es disminuir los costos de los dispositivos usados en la arquitectura de las WDM-PON, y optimizar los recursos a partir de la distribución adecuada de elementos en la red, haciendo viable su implementación a la vez que garantiza niveles de potencia óptica sensitivamente adecuados respecto de los receptores de la ONU [5], [6].

Actualmente, varios tipos de MUX reportados en la literatura son construidos con diferentes componentes ópticos tales como: los AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) [7], interferómetros Mach-Zehnder MZI (*Mach Zehnder Interferometer*) sobre fibra con redes de Bragg FBG (*Fiber Bragg Grating*) [8] [9], y FBG combinadas con circuladores y acopladores [9], además de otros diseños en guías de onda integradas en niobato de litio [10], con separación entre canales de hasta 50 Ghz. En la actualidad, uno de los parámetros relevantes en aplicaciones FTTX es el nivel de potencia que llega a las ONU; por ello es preferible el uso de dispositivos elaborados en la misma fibra óptica, que simplifican los procesos de mantenimiento, instalación y configuración, y minimizan las pérdidas por el acoplamiento mecánico entre dispositivos de diferentes tecnologías. Las FBGs son uno de los elementos con los que se construyen dispositivos en la misma fibra óptica, y con los cuales se elaboran otros dispositivos que realizan funciones de selección, filtrado y compensación espectral. La combinación de estas propiedades con la robustez y la posibilidad de elaborar dispositivos compactos en fibra, posicionan esta tecnología como una de las más importantes en las comunicaciones ópticas [11].

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de pérdidas de una red de fibra óptica que es configurada según distintas topologías, e implementada en el laboratorio de fibras ópticas del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) para pruebas de dispositivos y fallas basandose en diferentes topologías con un enlace hasta 45 km. Se caracteriza esta red a partir de la medición de potencia y pérdidas en las terminales cuya

topología es tipo estrella, y desde los resultados de la transmisión de pulsos de luz provenientes de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR, *Optical Time Reflectometer*) en las distintas terminales a fin de determinar el camino óptico para la detección de fallas en la estrella. Así mismo se muestra la construcción de un MUX de cuatro canales usando FBGs con una separación entre canales adyacentes de ~ 6 nm. Una vez que se insertan las señales del MUX en 12 km y de 32 km en esta red basada en una topología tipo estrella, se registran pérdidas de 2 dB y de 30 dB por canal, respectivamente. Se presenta un análisis teórico del corrimiento de longitudes de onda debido a variaciones térmicas en dos canales adyacentes en el MUX, y se concluye que es necesaria una diferencia térmica de 600 °C para un acercamiento significativo entre ambos. Se muestra este dispositivo como un diseño donde es poco probable el *crosstalk* por fluctuaciones térmicas debido a la amplia separación entre canales. Los niveles de potencia registrados proponen la implementación de este MUX desde una CO hacia una LTO menor de 10 km. Dada la recomendación del menor número de CO en las áreas metropolitanas, estos resultados permiten el diseño de esquemas de optimización de recursos a partir de una distribución adecuada de MUX en las redes WDM-PON con acceso a los usuarios finales en topología de estrella en un área metropolitana, conocido el máximo alcance entre el MUX y el nodo de distribución pasivo ubicado al final de la LTO y la sensibilidad de los detectores de la ONU [2].

2. MARCO TEÓRICO

Redes ópticas pasivas (PON)

La figura 1 muestra una arquitectura básica de una PON pasiva que está formada esencialmente por una OLT que se encuentra en CO, un divisor óptico (*Splitter*), y varias unidades de red óptica formadas por ONT ubicadas muy cerca de los usuarios finales. La transmisión se realiza entre la OLT y la ONU a través del divisor óptico, que direcciona el tráfico bidireccionalmente dependiendo si el canal es ascendente o descendente en una topología tipo estrella [1].

La ITU (International Telecommunication Union) generó el estándar G.983 para APON y BPON y G.984 para GPON's. La IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) dentro de los desarrollos de EFM

(*Ethernet in the First Mile*) generó los estándares para EPON's: IEEE 802.3ah para que sea compatible con cualquier red del estándar IEEE 802.3. La norma G.984 posibilita la explotación de las redes GPON hasta regímenes de 2.488 Mbps soportando además la tecnología WDM [13], [14].

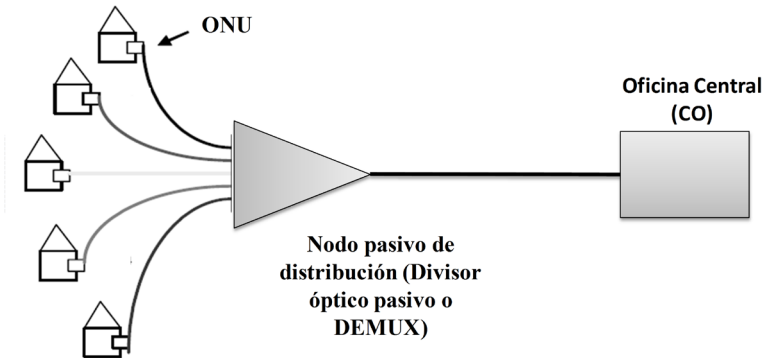


Figura 1. Arquitectura básica de una PON [12]

En el canal ascendente las ONU transmiten contenidos a la OLT por lo que es necesario el uso de acceso por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) para las GPON (*Gigabit PON*) y protocolo de control multipunto (MPCP, *MultiPoint Control Protocol*) para EPON (*Ethernet PON*). Para evitar interferencias entre los canales descendente y ascendente se utilizan longitudes de onda insertadas en el mismo hilo de fibra usando un multiplexor óptico (MUX) y filtros ópticos para separarlas después. Para el diseño y distribución de las PON es muy importante considerar la distancia entre usuario y la CO. Un usuario cercano a la CO necesitará una potencia menor, mientras que un usuario lejano necesitará una potencia mayor y una sensibilidad adecuada en el fotodetector. La potencia óptica es un parámetro importante en la minimización del despliegue de fibra óptica y la maximización la distancia entre el usuario final y la CO que es de hasta 20 km para GPON y 10 km para BPON.

Los MUX son los dispositivos importantes para redes WDM-PON, debido a que la creciente demanda de las redes FTTx supone una implementación masiva en redes metropolitanas para transmitirle a cada usuario en un canal dedicado a una velocidad de Gbps. En la figura 2 se muestra un esquema de una red WDM-PON. El MUX está ubicado en la CO, y es el dispositivo que permite compartir el ancho de banda de la fibra a partir

de la inserción de múltiples longitudes de onda sobre el mismo hilo, cuyas señales llegan posteriormente al nodo de distribución pasivo que direcciona la información hacia las ONU.

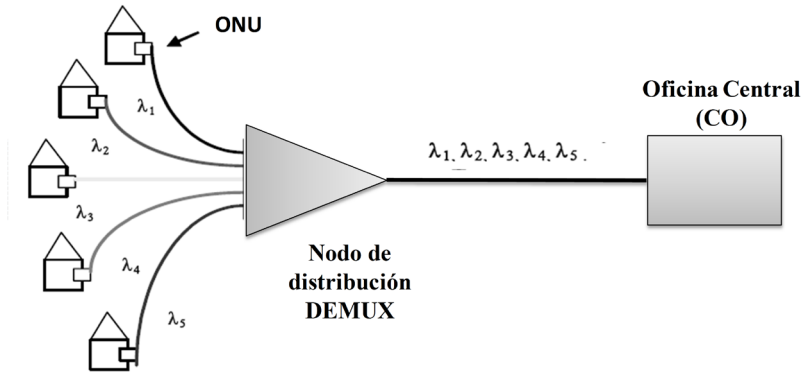


Figura 2. Esquema de una red WDM-PON

Redes de Bragg en fibra óptica

Una FBG es un elemento elaborado en una fibra óptica a la que se le perturba el índice de refracción en cierta región de su núcleo para modularlo periódica o cuasiperiódicamente. Si sobre la FBG incide una luz con cierto ancho espectral, una parte suya se refleja en una longitud de onda máxima denominada la longitud de onda Bragg, como se muestra en la ecuación (1) [7]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1).$$

Los parámetros n_{eff} y Λ , conocidos como el índice de refracción efectivo y la periodicidad de la variación del índice del núcleo perturbado, pueden ser afectados externamente por efectos mecánicos y térmicos.

En ausencia de deformación mecánica el corrimiento espectral de la longitud de onda de Bragg debido a efectos térmicos está dado por la ecuación (2) [11]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T \quad (2),$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica del silicio y ξ es el coeficiente termoóptico. A una λ_B de 1550 nm se calcula un corrimiento espectral

de ~ 1 nm por cada 100 °C, lo que muestra la posibilidad de sintonización espectral a partir de perturbaciones térmicas. Usando FBG se construyen filtros para diferentes aplicaciones en tecnología WDM, ecualizadores de ganancia, compensadores de dispersión, codificadores y decodificadores, además de sensores ópticos para aplicaciones específicas.

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

La figura 3 muestra el montaje experimental, que consiste en red modular NOYES construida con bobinas de 20 km de fibra óptica estándar monomodo (SMF) y 3 km de fibra óptica estándar multimodo (MMF). En UNO se extendió una bobina de 6 km de MMF constituida por cuatro hilos de 1,5 km de fibra unidos mediante empalmes por fusión realizados con una empalmadora Fujikura FS60; en DOS se extendió una bobina de 16 km de SMF de cuatro hilos de 4 km, que se unen de manera similar a como se hizo en el caso anterior; en TRES se ubicó un divisor de potencia de 50/50 para obtener una terminal adicional. CUATRO es una posibilidad de interconexión interna con DOS o cualquier terminal. Esta construcción se usó para analizar la transmisión de señales provenientes de un multiplexor óptico (MUX) de fibra óptica construido con redes de Bragg (FBG) para las redes pasivas multiplexadas por longitud de onda (WDM-PON) bajo el esquema de la sección B de la figura 3.

El montaje experimental del MUX que se mostró en la figura 4 consiste en un arreglo secuencial de cuatro FBGs conectadas en una de las terminales a un divisor de potencia óptica 50/50 bajo un esquema de detección por reflexión. Las longitudes de onda se reflejan en bandas centradas en 1.530,632; 1.536,420; 1.542,612; 1.548,594; nm, respectivamente, con anchos espectrales de ~ 20 GHz. En otra de las terminales se ubica a la fuente de luz LED Exalos EXS1560211 con un ancho espectral de 67 nm conectada a un aislador Newport ISC-1550; y en otro extremo se registra la respuesta del MUX en un analizador de espectros ópticos (OSA) de alta resolución Yokogawa AQ6370B.

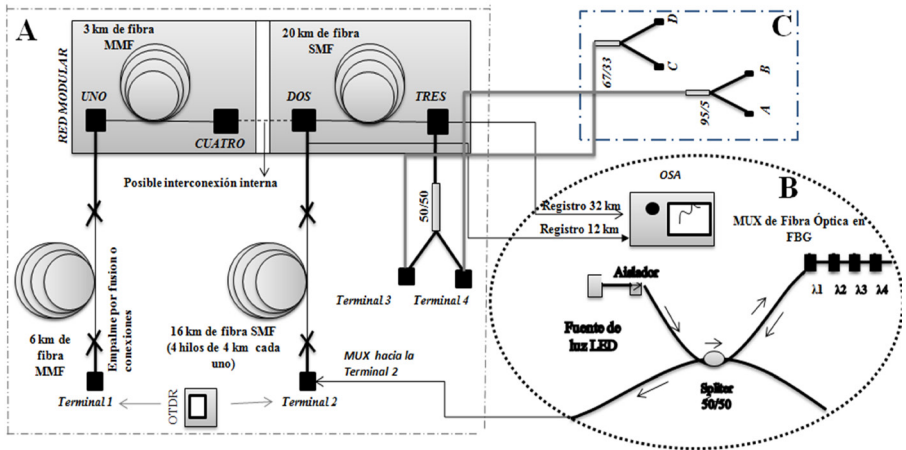


Figura 3. Montaje experimental de la red, MUX óptico, y topología estrella

Los espectros reflejados por el conjunto de las FBGs constituyen un MUX de cuatro canales. Su respuesta depende de las características propias de las FBGs, como son su valor de reflectividad ($\geq 75\%$, según el fabricante), pérdidas por inserción de 0,1 dB y las pérdidas $\sim 0,02$ dB debido a la presencia de conectores tipo FC/APC en sus extremos.

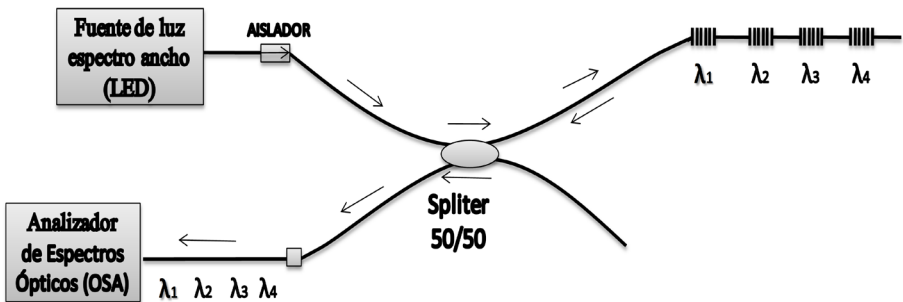


Figura 4. MUX de fibra óptica basado en FBGs

La fuente de luz tiene una potencia total de -12 dBm. Cada espectro reflejado por las FBGs es una pequeña porción del ancho de banda total de la fuente de luz, cuyas señales viajan sobre diferentes longitudes de fibra estándar monomodo (SMF-28) tipo G-652 con una atenuación 0,2 dB/km a 1500 nm tal como se muestra en la figura 5.

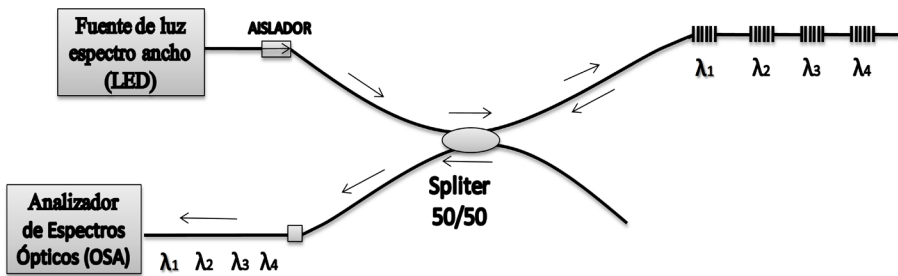


Figura 5. Montaje experimental para la caracterización de la transmisión de señales del MUX en dos LTO de longitudes 12 y 32 km, respectivamente

En el extremo indicado se realiza un registro espectral usando el OSA con una resolución de 0,05 nm, para determinar y analizar los cambios de potencia en cada canal por causa de la transmisión en ambos tramos. Los canales representan las señales insertadas por el MUX hacia una LTO desde una CO.

4. RESULTADOS

Se usó el OTDR EXFO 7500 para verificar la continuidad entre las terminales y la red modular bajo diferentes esquemas de conexión mediante la evaluación de las pérdidas y la reflectividad. Se realizaron pruebas en la terminal 1 (T1) y la terminal 2 (T2). La figura 6 muestra el registro de la T1 hasta DOS y de T2 hasta TRES usando el OTDR con longitudes de onda de 1310 nm y 1550 nm, y un ancho de pulso de 1 μ s. La figura 6a muestra el registro de T1 hasta DOS a 1550 nm, donde la atenuación promedio es de 0.582 dB/km y la pérdida máxima por empalme de 0.425 dB. La pérdida total en este segmento de \sim 9,2 km es de 5.409 dB. Los eventos reflexivos representados por picos están ubicados a \sim 6.2, 7.6, y 8.7 km y registran una reflectividad de -59,3, -48,1, -43,8 dB, respectivamente, donde -43,8 dB corresponde al pico más alto en el enlace. Para el registro a 1310 nm la atenuación promedio es de 0.904 dB/km y la pérdida de 8,403 dB. La variación de estos valores con respecto a los registrados a 1550 nm es debido a la dependencia de la atenuación y las pérdidas con la longitud de onda del pulso de prueba. A diferencia de los valores de pérdida y atenuación, la reflectividad es similar a ambas longitudes de onda debido a que no hay una dependencia de este parámetro con la misma. Similarmente, la figura

6b muestra el registro desde la terminal 2 hasta TRES. Para el registro a 1550 nm, la atenuación promedio y la pérdida total en este segmento de 36 km es de 0.369 dB/km y 13,33 dB. Los eventos reflexivos están ubicados a ~16, 17, 23, 31 y 32 km y registran una reflectividad que va desde 23, 5 dB hasta 60,1 dB. A 1310 nm la atenuación promedio es de 0.541 dB/km y la pérdida de 19,478 dB. La terminal 4 presenta pérdida por inserción de ~1,5 dB según los datos del fabricante.

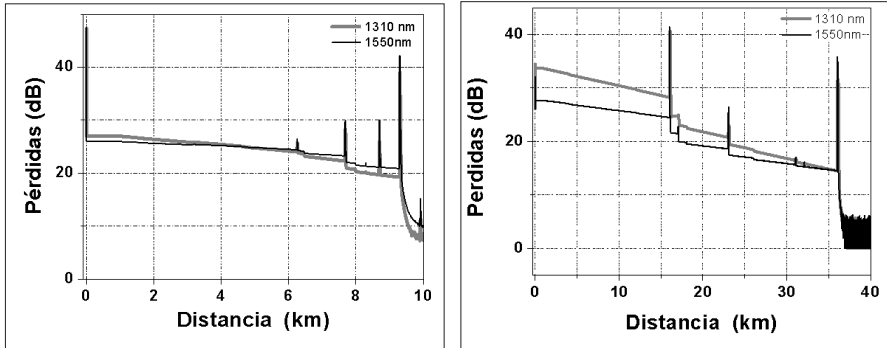


Figura 6. a. Registro desde T1 hasta DOS. b. Registro desde la T2 hasta TRES

Los resultados de la configuración en estrella muestran que la potencia inicial de la fuente de luz FLS60 fue de +2,08 y -2,25 dBm. En la figura 7 se muestra la potencia y las pérdidas registradas en las terminales con respecto a la relación de división de cada acoplador que sigue una función exponencial [11]:

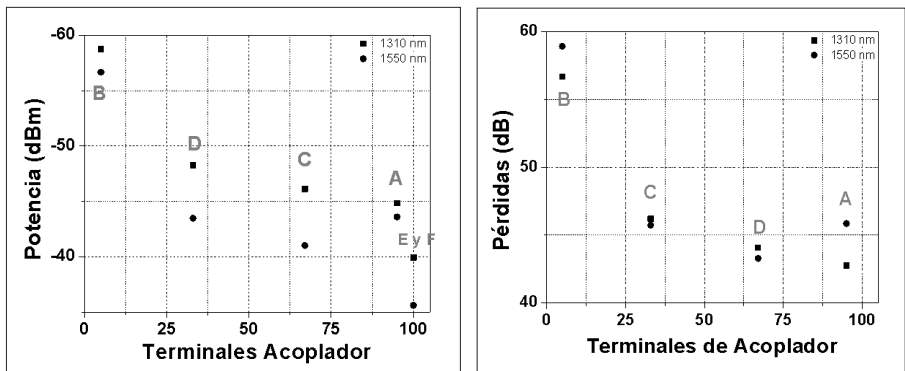


Figura 7 a. Potencia óptica en las terminales de los acopladores a 1310 y 1550 nm b. Pérdidas en las terminales de los acopladores a 1310 y 1550 nm

En la figura 8 se presentan los resultados experimentales en cada terminal obtenidos con el OTDR con un ancho de pulso de 275 ns a 1310 nm y 1550 nm, respectivamente, donde se muestra que en esta topología A y C son las dos terminales que configuran los caminos más adecuados para la detección de fallas.

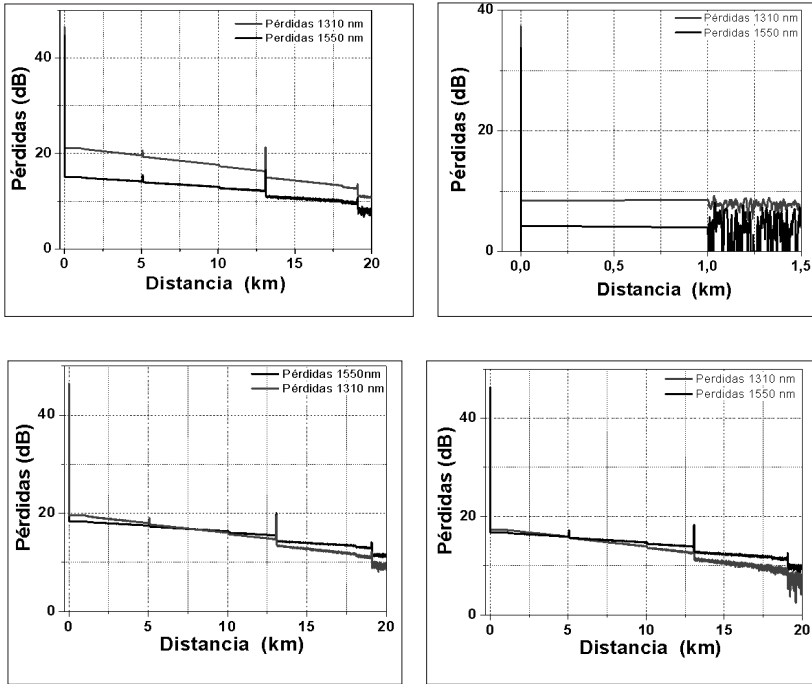


Figura 8 a. Registro en A reporta la detección de 5 fallas a ~0,2, 10, 13, 18, 19 km. **b.** Registro en B reporta la detección de 2 fallas a ~0,01 y 0,05 km; se observa que el alcance máximo del pulso es de 160 m. **c.** Registro en C reporta la detección de 5 fallas a las mismas distancias de la parte a. **d.** Registro en D reporta la detección de 4 fallas a ~5, 10, 13, 19 km.

En la figura 9 se presenta el espectro de la fuente de luz (LED) usada para iluminar cada una de las FBGs del MUX basado en FBG, con una potencia máxima de ~-22 dBm.

En la figura 10 se muestran los cuatro canales definidos por el arreglo de FBGs. En la tabla 1 se muestra la longitud de onda de cada canal correspondiente a la longitud de onda central del espectro reflejado por las FBGs, en el cual se observa una separación > 5 nm por lo que el sistema

trabajado en este experimento se clasifica como un CWDM, según lo definido por la normatización internacional de la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) [14].

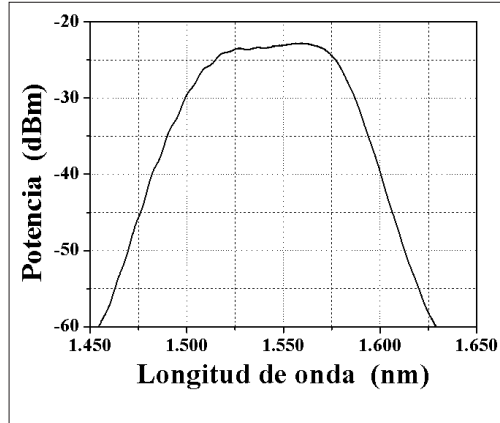


Figura 9. Espectro de la fuente de luz LED

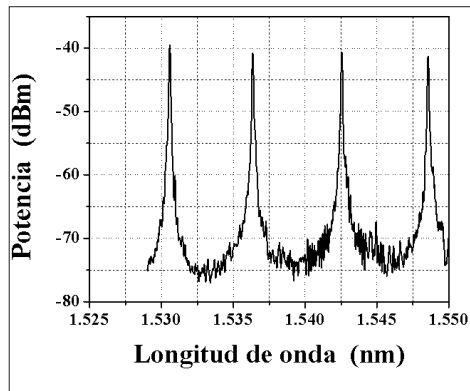


Figura 10. Respuesta espectral de los canales del MUX

Tabla 1

Longitud de onda central y potencia máxima de los canales del MUX

Canal (λ)	Longitud de onda central (nm)	Potencia máxima (dBm)
λ_1	1.530,632	-39,568
λ_2	1.536,420	-40,803
λ_3	1.542,612	-40,637
λ_4	1548,594	-41,291

La variación de la posición de la longitud de onda central de las FBGs debido a las fluctuaciones térmicas constituye una limitante para la integración de este tipo de MUX en la arquitectura de la red. En la figura 11 se muestran los resultados de un análisis teórico realizado en Mathematica 7.0, según los registros espectrales de las FBGs utilizadas en la construcción del MUX con el objetivo de analizar el corrimiento de la longitud de onda central debido a cambios térmicos en dos FBGs adyacentes, separadas 0,4 nm, y que se define como la separación mínima para un sistema WDM [2]:

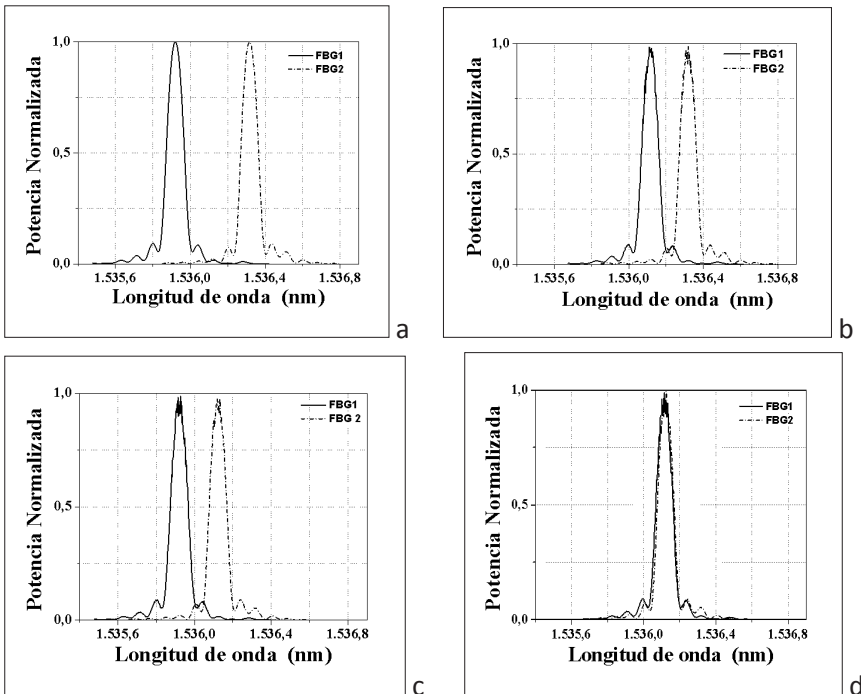


Figura 11. a) Espectros de las FBGs (FBG1 y FBG2) a una temperatura de referencia de 25 °C separadas 0.4 nm. b) Respuesta de la FBG1 que alcanza una temperatura de 40 °C. c) Respuesta de la FBG2 que alcanza una temperatura de 10 °C. d) Respuestas de las FBG1 que alcanza una temperatura de 40 °C y de la FBG2 que alcanza una temperatura de 10 °C.

La figura 11 muestra que un cambio térmico de +/- 15 °C da como resultado un acercamiento entre las FBGs adyacentes en una banda espectral de 0,39 nm. La separación de ~6 nm entre canales adyacentes disminuye la posibilidad de *cross-talk* por variaciones térmicas frecuentes en una región tropical.

Se presentan los registros para la transmisión de los cuatro canales por LTO de fibra de diferente longitud (32 y 12 km), con diferentes capacidades de transmisión, para definir las condiciones necesarias para la detección con éxito de cada canal después de la transmisión. Las pérdidas se caracterizan con respecto a la respuesta *back-to-back* mostrada en la figura 5. Para este experimento, la decisión de usar amplificadores ópticos se ve limitada por el valor máximo de potencia entregada por la fuente, que no posibilita la emulación de un sistema real.

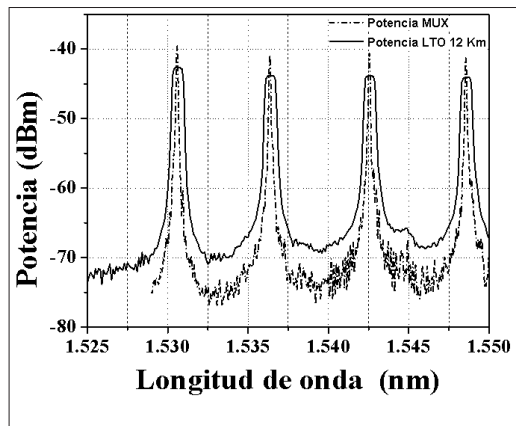


Figura 12. Espectro óptico de las señales del MUX insertadas en una LTO de 12 km

La figura 12 muestra los resultados experimentales luego de la transmisión a través de una LTO de 12 km de fibra SMF; en este caso las potencias máximas medidas fueron del orden de ~ -42 dBm para cada canal. Las pérdidas por canal son ~ 2 dB con respecto a la potencia inicial en el MUX registrada en la figura 10.

Para una transmisión sobre 32 km de fibra SMF se observa que la potencia máxima para cada canal es de ~ -72 dBm, lo que da como resultado una pérdida por canal de 30 dB como se muestra en la figura 8. La longitud de fibra de 12 km se construyó uniendo tramos con una empalmadora por fusión Fujikura FS 60, que realiza uniones con pérdidas inferiores a 0,01 dB. En la longitud de 32 km se usaron elementos de conectorización mecánica la construcción por lo que se reporta un valor de pérdidas alto con respecto al anterior.

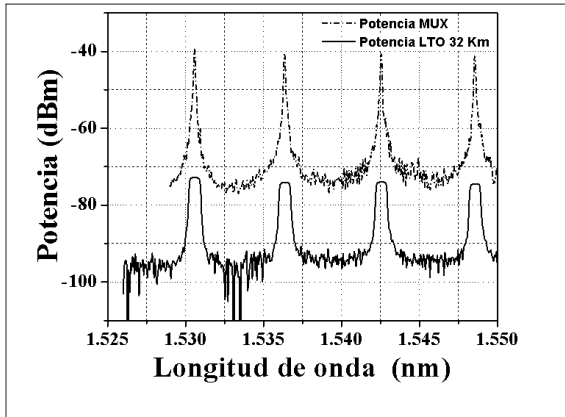


Figura 13. Espectro óptico de las señales del MUX insertadas en una LTO de 32 km

Bajo el esquema de construcción mostrado en la figura 4 es posible construir MUX con bajas pérdidas por inserción de $\sim 2,2$ dB. Esto se logra cambiando el divisor de potencia 50/50, que tiene unas pérdidas por inserción de 3 dB, por un divisor de potencia 1/99 cuyas pérdidas por inserción son de 0,5 dB.

5. DISCUSIÓN

Se verificó el funcionamiento de los diferentes segmentos de la configuración reportada en este trabajo a través del análisis de la atenuación promedio en el enlace, la pérdida promedio, y la reflectividad. Se comprobó que la atenuación promedio y pérdidas registran valores diferentes a 1550 nm y 1310 nm, y que los valores de reflectividad son similares para las dos longitudes de onda. Esta configuración posibilita tanto la simulación de diferentes topologías y distancias como la ampliación de la misma por adición de terminales con el uso de divisores, y la prueba de dispositivos multiplexores en esta topología [15].

Se construyó una terminal tipo estrella usando acopladores con diferentes razones de acoplamiento: (50/50, 5/95, 33/67). En la figura 7 se observa una dependencia exponencial de las pérdidas y la potencia, y los resultados experimentales obtenidos se ajustan a funciones exponenciales decrecientes [11].

Se analizó la transmisión de señales en LTO de la red modular NOYES de fibra óptica SMF de diferente longitud y diferentes características de transmisión usando un MUX de cuatro canales. La propuesta para la construcción del MUX muestra un esquema de simple construcción donde es posible obtener bajas pérdidas por inserción, ya que no se usan circuladores ópticos cuyas pérdidas por inserción son hasta ~ 1 dB; sin embargo, estos últimos son parte de los MUX implementados actualmente para realizar funciones de adición y supresión [4].

Basados en un análisis teórico se muestra que no hay un acercamiento significativo entre canales debido a efectos térmicos; dada la gran separación entre canales ~ 6 nm; además, en concordancia con el modelo lineal de la ecuación 2 se calcula un cambio de 600 °C entre canales adyacentes para un acercamiento total.

Los niveles de potencia para la transmisión en los 12 km son aceptables si se usan fotodetectores comerciales cuya sensibilidad mínima sea de ~ -40 dBm. Usando fuentes de luz con mayor potencia óptica total (~ 0 dBm), FBGs de mayor reflectividad ($\geq 90\%$) y elementos con menos pérdidas por inserción en la construcción del MUX, es posible aumentar la distancia alcanzada en la transmisión de las señales en las LTO. Se propone el uso de este MUX para una LTO construida de fibra óptica SMF con una longitud menor a 10 km y con mínimas pérdidas en el tramo. Para trabajos futuros se propone un análisis y caracterización de las señales cuando estas pasan por un divisor óptico pasivo en una red tipo estrella y su compatibilidad con la red del hogar, así como también de los efectos de formatos de modulación sobre la señal transmitida [16]. Para aumentar la distancia de transmisión se sugiere el uso de amplificadores ópticos, o el uso de fibras ópticas de bajas pérdidas u otros tipos de fibras [17], además de fuentes de luz LED de mayor potencia óptica, y el uso de fotodetectores más sensitivos.

6. CONCLUSIONES

Se muestra el diseño de una red de fibra óptica de pruebas que se configura a partir de diferentes topologías y también un MUX óptico en el que se usan FBGs con bajas pérdidas por inserción. La transmisión en los 12 km da como resultado potencias aceptables a la sensibilidad de

los fotodetectores comerciales, por lo que se propone este dispositivo para la transmisión de señales en una LTO menor a 10 km. Para el caso de distancias mayores se recomienda evaluar los parámetros de diseño y cambiar algunos elementos del MUX que permitan tener mayores niveles de potencia óptica. Estos resultados muestran un derrotero de diseño para la distribución de MUX en redes WDM-PON en una ciudad. De acuerdo con los resultados de la simulación numérica para FBGs adyacentes y cercanas, el dispositivo diseñado es ideal para el uso en condiciones térmicas extremas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Exalos S. A. de Suiza por la donación de la fuente de LED.

Referencias

- [1] L.G. Kazovski, W.T Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng and S.W. Wong, "Next-Generation on Optical Access Network", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, n.º 4, pp. 3428-3442, 2007.
- [2] N.K. Dutta. *WDM technologies: Optical Network*. New York: Academic Press, 2004.
- [3] G.K Chang, A. Chowdhury, Z. Jia, H.G. Chien, M.F. Huang, J. Yu and G. Ellinas, "Key Technologies of WDM-PON for Future Converged Optical Broadband Access Networks [Invited]", *Optics Communications Network*, vol. 1, n.º 4, pp. 35-50, 2009.
- [4] J. Kim, J. Parka, S. Chunga, N. Parka and B. Lee, "Bidirectional wavelength add/drop multiplexer using two separate MUX and DEMUX pairs and reflection-type comb filters", *Optics Communications*, vol. 205, n.º 4-6, pp. 321-327, 2002.
- [5] I.T. Monroy, N.G. González, A. Caballero, K. Prince, D. Zibar, T. Gibbon, X. Yu and J.B. Jensen, "Convergencia de sistemas de comunicación ópticos e inalámbricos", *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 42, n.º 2, pp. 83-90, 2009.
- [6] J.H. Lee, K. Lee, S.B. Lee and C.H. Kim, "Extended-reach WDM-PON based on CW supercontinuum light source for colorless FP-LD based OLT and RSOA-based ONUs", *Optical Fiber Technology*, vol. 15, pp. 310 - 319, 2009.
- [7] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings Optics and photonics*. New York : Academic Press, 1999.

- [8] D. Mechin, P. Grosso and D. Bosc, "Add-Drop Multiplexer With UV-Written Bragg Gratings and Directional Coupler in SiO₂-Si Integrated Waveguides", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, n.º 6, pp. 1282-1286, 2001.
- [9] R. Romero, O. Frazão, F. Floreanic, L. Zhang, P.V.S. Márquez and H.M. Salgado, "Chirped fibre Bragg grating based multiplexer and demultiplexer for DWDM applications", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 43, n.º 9, pp. 987-994, 2005.
- [10] P. Ganguly, J.C. Biswasa and S.K. Lahiria, "Analysis of Ti:LiNbO₃ zero-gap directional coupler for wavelength division multiplexer/demultiplexer", *Optics Communication*, vol. 28, n.º 12, pp. 3269-3274, 2008.
- [11] A.W. Snyder and J.D. Love, *Optical Waveguide Theory*. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2000.
- [12] R. Mastrodonato and G. Paltenghi, "Analysis of a Bandwidth Allocation Protocol for Ethernet Passive Optical (EPON)", *Transparent Optical Network*, Proceeding of 2005 7th International Conference, pp. 241-244, 2005.
- [13] K.S. Kim. "On the evolution of PON-based FTTH solutions", *Information Sciences*, vol. 149, pp. 21-30, 2003.
- [14] ITU-T, PON-Standards. www.itu.int. International Union Telecommunication. [Online]. [Cited: 03 7, 2009.]
- [15] K. Sivalingam, *Emerging optical network technologies: architectures, protocols, and performance*. Washington: Springer, 2005.
- [16] A. Caballero, J.B Jensen, D. Zibar and I. T. Monroy, "5 GHz 200 Mbit/s radio over polymer fibre link with envelope detection at 650 nm wavelength", *Electronics Letter*, vol. 44, n.º 25, pp. 1479-1480, 2008.
- [17] P. Chanclou, Z. Belfqih, B. Charbonnier, T. Duong, F. Frank, N. Genay, M. Huchard, P. Guignard, L. Guillo, B. Landousies, A. Pizzinat, H. Ramanitra, F. Saliou, S. Durel, P. Urvoas, M. Ouzzif and J. Le Masson C. R., "Access network evolution: optical fibre to the subscribers and impact on the metropolitan and home network", *Physique*, vol. 9, pp. 935-946, 2008.